

Pengaruh Jenis Mulsa terhadap Kapasitas Penambatan Spesifik Nitrogen Cemara Udang (*Casuarina equisetifolia* Linn.) pada Kondisi Tempat Tumbuh yang Berbeda

The Effect of Mulch Types on Nitrogen Fixation Capacity of Casuarina equisetifolia Linn. with Different Site Conditions

A. Triyogo^{1*}, Sumardi¹ dan D.A. Winastuti¹

Diterima 6 Februari 2008/Disetujui 24 Juni 2008

ABSTRACT

Nitrogen fixation’s processes on the plants are determined by numbers of roots nodule formed on rootery system and by their ability to fix the nitrogen. The activity of root nodule in nitrogen fixation’s processes gives a great contribution for the plant growth. The aim of this research is to study the effect of mulch types on the forming root nodule and also the capacity of air nitrogen specific fixation of *C. equisetifolia* Linn. with different site conditions. This research use split-split plot design with factorial treatment. The plants of *C. equisetifolia* Linn. were planted on three different sites using three kinds of mulch. The (approach) method used to find out the forming of root nodule was to count the numbers and the dry weight of root nodule, while the measurement of the capacity of root nodule on the nitrogen fixation used the Acethylene Reduction Capacity method (ARA). The result of this research showed that the site of underground growth white sand beach had the best forming root nodule. For the mulch treatment, straw mulch showed the best nitrogen fixation ability, that was 13.8x10⁻⁹n g N₂/g nodule dry weight/days and for interaction treatment, straw mulch at lime stone with inoculation showed the highest nitrogen fixation that was 26.45x10⁻⁹n g N₂/g nodule dry weight/days.

Key words: nitrogen specific fixation, *Casuarina equisetifolia* Linn., growth

PENDAHULUAN

Daerah Istimewa Yogyakarta memiliki sekitar 17.000 ha areal hutan yang 8.000 ha diantaranya merupakan areal bukit berpasir (pantai). Areal tersebut merupakan sumber daya alam yang potensial sebagai kawasan wisata, pendukung pertanian dan kehutanan (Suhardi dan Sutikno, 2002). Kawasan pantai yang selama ini kurang mendapatkan perhatian merupakan salah satu kawasan yang rawan bahaya erosi khususnya erosi oleh angin (abrasi) yang dapat menyebabkan terjadinya lahan “sand dune”. Untuk menghambat perluasan lahan kritis atau erosi pasir oleh angin dan mengubah lahan kritis menjadi lahan produktif perlu dilakukan rehabilitasi lahan pantai.

Dalam upaya tersebut, tanaman cemara udang (*Casuarina equisetifolia* Linn.) merupakan salah satu jenis tanaman yang saat ini secara luas ditanam di kawasan pantai. Cemara udang dipilih karena mampu beradaptasi dengan baik pada lahan pasir yang memiliki kadar garam tinggi. Akar tanaman ini mampu membentuk asosiasi dengan *Frankia* dan mikorisa yang

membantu akar dalam menyerap unsur hara dari dalam tanah. Lahan pantai memiliki kelemahan antara lain salinitas yang tinggi, kandungan hara rendah, evaporasi tinggi, serta kandungan air tanah yang rendah. Kelemahan yang lain adalah, aliran permukaan yang terlalu besar seringkali terjadi di wilayah pantai terutama pada musim penghujan sehingga dapat mengakibatkan hilangnya sebagian unsur hara yang terdapat di dalam tanah dan mengganggu pertumbuhan tanaman.

Pemulsaan merupakan salah satu cara untuk mengatasi kelemahan lahan pantai. Praktek pemulsaan dilakukan untuk memperoleh beberapa keuntungan yang dapat memperbaiki sifat-sifat tanah, yang nantinya akan memperbaiki produktifitas tanah yang bersangkutan. Fungsi cemara udang secara tidak langsung dipengaruhi oleh kemampuannya mengikat nitrogen dari udara, sedangkan pengikatan nitrogen dari udara ditentukan oleh jumlah bintil akar dan kemampuan bintil akar dalam mengikat nitrogen. Percepatan dan peningkatan kemampuan penambatan nitrogen pada lahan marginal dapat dilakukan melalui

¹⁾Lab. Perlindungan dan Kesehatan Hutan
Fakultas Kehutanan Universitas Gadjah Mada Bulaksumur 55281 Yogyakarta
Telp. (0274) 512102/901401, email: triyogo99@ugm.ac.id

manipulasi lingkungan seperti pemulsaan maupun melalui pemupukan. Mengingat tanaman cemara udang mempunyai potensi untuk penanganan lahan pasir pantai di Yogyakarta, maka perlu diteliti seberapa besar pengaruh jenis mulsa terhadap pertumbuhan bintil akar serta kapasitas penambatan nitrogennya. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh jenis mulsa terhadap pembentukan bintil akar dan kapasitas penambatan spesifik nitrogen cemara udang pada berbagai kondisi tempat tumbuh.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilakukan di Pantai Sundak Kecamatan Tepus, Kabupaten Gunung Kidul, Daerah Istimewa Yogyakarta, Laboratorium Tanah Hutan Fakultas Kehutanan Universitas Gadjah Mada, dan Laboratorium Analisis Kimia Fisika Universitas Gadjah Mada pada bulan April – Desember 2003.

Bibit cemara udang yang digunakan adalah bibit berusia 5 bulan yang diperoleh dari Persemaian Pantai Sili dan telah diinokulasi dengan *Frankia*. Inokulum *Frankia* diperoleh melalui bintil akar cemara udang yang digerus rata dan langsung digunakan sebagai inokulum, sebanyak 10 g sejak biji cemara mulai berkecambah. Penelitian ini menggunakan rancangan percobaan *split-split plot* yang perlakuannya disusun secara faktorial (3x3x2) dengan 3 faktor, yaitu faktor tempat tumbuh, mulsa dan inokulasi *Frankia*.Perlakuan dalam penelitian ini dibagi tiga yaitu: 1. Tiga tapak/lokasi tempat tumbuh (T) sebagai *main-plot* meliputi Gunung gamping (T₁), Pantai pasir putih (T₂), Pantai pasir putih bertumbuhan bawah (T₃); 2. Tiga

jenis mulsa (M) sebagai *sub- plot* meliputi Mulsa plastik hitam (M₁), Mulsa jerami (M₂), dan Mulsa kompos (M₃); 3. Inokulasi *Frankia* (I) sebagai *sub-sub plot* meliputi Inokulasi *Frankia* (I₁) dan Tanpa inokulasi *Frankia* (I₀).

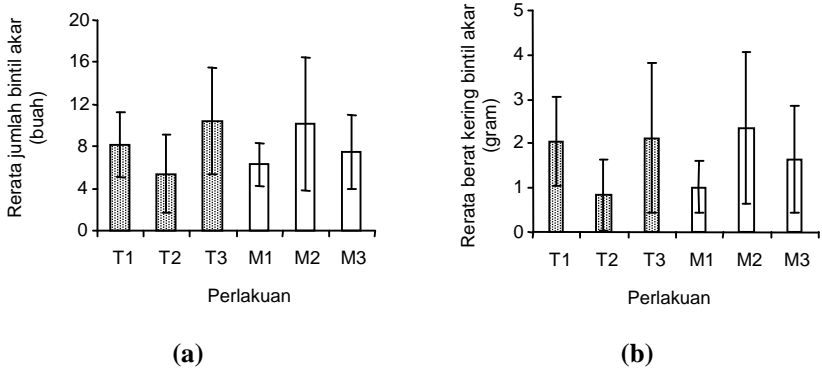
Tingkatan dari perlakuan-perlakuan tersebut setelah dikombinasikan maka terdapat 18 kombinasi. Setiap kombinasi diulang dan diacak dalam 3 blok ulangan sehingga terdapat 162 unit penelitian. Variabel yang diamati meliputi pembentukan bintil akar yang diukur dengan menghitung jumlah serta bobot kering bintil akar, serta kapasitas penambatan spesifik nitrogen bintil akar yang diukur menggunakan metode ARA (*Acethylene Reduction Capacity*).

Data yang diperoleh diuji secara statistik dengan analisis sidik ragam (*Analysis of Variance*) pada taraf uji 5% dan hasil analisis yang berbeda nyata diuji lanjut dengan uji jarak ganda Duncan (*Duncan Multiple Range Test/DMRT*) pada taraf nyata 5% (Gomez dan Gomez, 1984).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembentukan Bintil Akar

Analisis sidik ragam terhadap jumlah dan bobot kering bintil akar menunjukkan bahwa perlakuan tapak dan mulsa memberikan pengaruh yang nyata. Hasil uji lanjut menunjukkan bahwa pada tapak pantai pasir putih bertumbuhan bawah pembentukan bintil akar terjadi lebih baik dibandingkan gunung gamping dan pantai pasir putih (Gambar 1a dan 1b).



Gambar 1. Hasil uji DMRT perlakuan tapak dan mulsa terhadap (a) jumlah bintil akar dan (b) berat kering bintil akar

Keterangan : M₁: Mulsa plastik hitam T₁: Gunung Gamping
M₂: Mulsa jerami T₂: Pantai Pasir Putih
M₃: Mulsa Kompos T₃: Pasir Putih Bertumbuhan Bawah

Berdasarkan Gambar 1a, jumlah bintil akar terbanyak ditunjukkan oleh perlakuan mulsa jerami (10 buah) dan pada tapak pasir putih bertumbuhan bawah (10 buah). Perkembangan bintil akar diamati melalui bobot kering yang diperoleh (Gambar 1b). Bintil akar dengan bobot kering terbesar dihasilkan pada cemara udang yang ditanam di tapak tapak pasir putih bertumbuhan bawah (2.12 g) dan pada cemara udang dengan pemberian mulsa jerami (2.4 g). Kandungan bahan organik mentah atau belum mengalami dekomposisi sempurna pada bahan mulsa berpengaruh terhadap interaksi tanaman dengan mikrobia. Ji dan Unger (2001) mengatakan bahwa penambahan mulsa jerami dapat meningkatkan kelembaban dalam tanah yang diikuti dengan peningkatan unsur C.

Peningkatan unsur C dalam rhizospher mengakibatkan peningkatan produksi eksudat akar dan memacu interaksi antara tanaman dengan mikrobi (Haase *et al.*, 2007). Marilley *et al.* (1999) mengatakan bahwa peningkatan produksi eksudat akar tanaman pada kondisi C yang meningkat, memacu terjadinya simbiosis mikroorganisme pengikat nitrogen dengan tanaman. Lebih lanjut Cabrerizo *et al.* (2001) menjelaskan peningkatan eksudat akar termasuk senyawa *chemoattractants* (*malate*, *phenolic acids*, *flavonoids*) dan senyawa-senyawa sinyal lain dapat memantapkan simbiosis tanaman dengan bakteri penambat nitrogen dan sekaligus peningkatan pasokan C pada bintil akar.

Tabel 1. Suhu tanah lokasi tanaman uji (°C)

Mulsa	Pengukuran			Rerata
	I	II	III	
Plastik Hitam (M ₁)	30.4	31.1	31.3	30.9
Jerami (M ₂)	28.2	27.1	27.9	27.7
Kompos (M ₃)	28.3	28.9	27.5	28.2

Simbiosis antara tanaman inang dengan mikroorganisme penambat nitrogen sangat sensitif pada kondisi lingkungan (Hungria dan Bohrer, 2000). Hasil pengukuran suhu tanah lokasi penelitian (Tabel 1) menunjukkan bahwa suhu tanah dengan mulsa jerami sebesar 27.2 °C, plastik hitam 30.9 °C dan kompos 28.2 °C. Suhu tanah secara tidak langsung berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman (Abberton *et al.*, 1998) salah satunya adalah pada lambatnya proses pembentukan bintil akar (Pan dan Smith, 1998). Pembentukan dan perkembangan bintil akar sebagai respon perubahan suhu bervariasi antar tanaman tanaman inang (Haase *et al.*, 2007).

Penelitian mengenai suhu optimum pembentukan bintil akar pada jenis legum dilakukan oleh Lira *et al.* (2005) dengan menggunakan tanaman *Phaseolus vulgaris* L., *Lens culinaris* Medik. dan *Pisum sativum* L. dengan hasil bahwa pembentukan ukuran bintil akar terbesar berturut-turut pada suhu 25.8 °C, 15.8 °C dan 20.8 °C. Sayed *et al.* (1997) menambahkan bahwa *Frankia* yang diisolasi dari *C. equisetifolia* tidak menunjukkan penurunan aktivitas pada suhu 25 °C, namun demikian terjadi penurunan aktivitas sampai

dengan 50% setelah 12 minggu di lapangan. Reddel *et al.* (1985) menambahkan bahwa suhu tanah optimum untuk pertumbuhan *C. cunninghamiana* yang bergantung pada simbiosis dengan bakteri penambatan nitrogen adalah 25 °C, pada kondisi suhu di bawah 25 °C tanaman akan mengalami penurunan pertumbuhan secara signifikan.

Semua faktor yang mempengaruhi proses fisiologi dan biokimia bakteri mikrosimbion dan tanaman inangnya akan menentukan pembentukan dan perkembangan organ penambat nitrogen yaitu bintil akar (MacDicken, 1994). Hansen *et al.* (1990) menyatakan bahwa kemampuan untuk mengendalikan pembentukan bintil akar suatu jenis tanaman ditentukan oleh faktor lingkungan dan tanaman itu sendiri. Salah satu faktor yang menentukan terjadinya fungsi simbiosis *Casuarina-Frankia* adalah status unsur fosfor (P) dalam tanah (Yang, 1995). Hasil analisis kimia sampel tanah (Tabel 2) menunjukkan bahwa kandungan P pada tapak pantai pasir putih bertumbuhan bawah lebih tinggi (4954.4 ppm) dibandingkan gunung gamping (891.4 ppm) dan pantai pasir putih (1459.8 ppm).

Tabel 2. Hasil analisis kimia sampel tanah

Lokasi	pH	Kadar N (%)	Kadar P (ppm)	Kadar K (ppm)
Gunung gamping (T ₁)	7.12	0.379	891.4	160.04
Pantai pasir putih (T ₂)	6.9	0.345	1459.8	89.15
Pasir putih bertumbuhan bawah (T ₃)	7.5	0.224	4954.4	71.6

Pasokan unsur P melalui larutan hara tanah pada tanaman meningkatkan jumlah, bobot kering, dan ukuran rata-rata bintil. Hal ini menandakan bahwa kekahatan unsur P secara tidak langsung mempengaruhi proses pembentukan bintil akar dan penambatan nitrogen melalui pengaruhnya terhadap pertumbuhan tanaman inang. Laju fiksasi nitrogen oleh tanaman dipengaruhi oleh terbatasnya pasokan unsur-unsur yang lain, khususnya unsur fosfor (P) (Binkley *et al.*, 2003). Lebih lanjut dijelaskan bahwa unsur P yang cukup dalam tanah lebih berperan kepada peningkatan fiksasi nitrogen dibandingkan kepada pertumbuhan tanaman. Pertumbuhan tanaman yang berasosiasi dengan penambat nitrogen umumnya dibatasi oleh rendahnya pasokan unsur P dari dalam tanah, dan unsur P secara tidak langsung juga mempengaruhi penyerapan nitrogen oleh tanaman. Rudresh *et al.* (2005) menjelaskan bahwa peningkatan N dalam tanah juga meningkatkan

akumulasi C dalam tanah; setiap kg akumulasi unsur N berasosiasi dengan 10.2 kg akumulasi C.

Pada penelitian ini, kecenderungan bintil akar dalam jumlah banyak dan bobot kering yang besar diperoleh pada tanaman inang dengan pertumbuhan yang baik pula. Hal ini berbeda dengan pembentukan bintil akar pada beberapa tanaman legum seperti *Paraserianthes falcataria* dan *Acacia* spp. yaitu bintil akar dengan jumlah sedikit ditemui pada tanaman inang dengan pertumbuhan yang tinggi, sedangkan bintil akar dalam jumlah yang banyak ditemui pada tanaman dengan pertumbuhan yang rendah (Nutman, 1952).

Kapasitas Penambatan Nitrogen. Berdasarkan perhitungan terhadap besarnya *peak area* standar gas etilen (Tabel 3) diperoleh persamaan:

Y = 1035.2592 + 1347865593000x

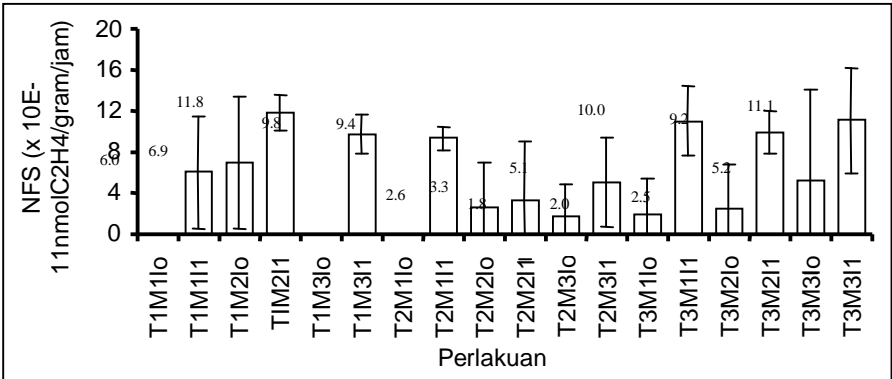
Keterangan: Y = Peak area ; x = [C₂H₄] dalam n mol

Tabel 3. Hasil perhitungan standart gas etilen

Konsentrasi (x 10 ⁻² ppm)	Peak area	n mol (x 10 ⁻¹⁰)
1	1540	3.571
2	1902	7.142
3	2550	10.714
4	2988	14.285
6	3898	21.428

Persamaan tersebut digunakan untuk menghitung besarnya etilen (C₂H₄) yang dihasilkan dengan menggunakan data *peak area* hasil uji nitrogenase dari masing-masing perlakuan. Analisis sidik ragam pengaruh perlakuan terhadap kapasitas penambatan spesifik nitrogen disajikan pada Tabel 6. Jenis mulsa

dan tapak maupun perlakuan interaksi tidak menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap kapasitas penambatan spesifik nitrogen, perbedaan rerata kapasitas penambatan nitrogen akibat perbedaan masing-masing jenis mulsa dan tapak disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kapasitas penambatan spesifik nitrogen bintil akar cemara udang (x10⁻¹¹n molC₂H₄/g/jam)

Jenis mulsa jerami menunjukkan kapasitas penambatan nitrogen yang tertinggi yaitu 6.17x10⁻¹¹n molC₂H₄/g bobot bintil/jam (13.8x10⁻⁹n g N₂/g bobot

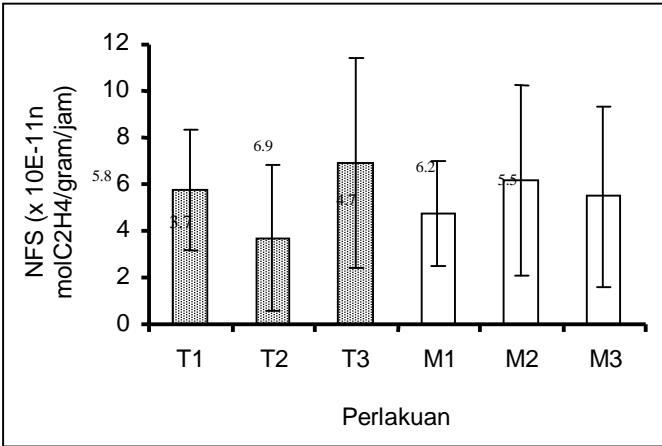
bintil/hari) dengan masa aktif bintil akar selama 4 jam. Jenis mulsa kompos menunjukkan kapasitas penambatan nitrogen sebesar 5.48x10⁻¹¹n molC₂H₄/g

bobot bintil/jam (12.27×10^{-9} g N₂/g bobot bintil/hari) dan jenis mulsa plastik hitam sebesar 4.73×10^{-11} n molC₂H₄/g berat bintil/jam (10.59×10^{-9} g N₂/g bobot bintil/hari). Perlakuan mulsa jerami menghasilkan kapasitas penambatan spesifik nitrogen yang lebih tinggi disebabkan karena proses dekomposisi lanjut yang terjadi terhadap mulsa jerami dapat merangsang aktivitas mikroorganisme yang hidup di dalam tanah. Lebih lanjut Rao (1994), menjelaskan bahwa jumlah *Actinomycetes* akan meningkat dengan adanya bahan organik yang mengalami dekomposisi. Selama bahan organik terdekomposisi, sebagian karbon (C), hidrogen dan oksigen dilepaskan sebagai karbondioksida dan air yang mengakibatkan tingginya nilai C/N ratio. Tingginya nilai C/N ratio dalam tanah menunjukkan rendahnya kandungan N dalam tanah.

Pada mulsa kompos proses dekomposisi terhadap bahan mulsa sudah berkurang, aktivitas mikrobia rendah dan pada kondisi ini jumlah jasad mikro berkurang. Jumlah jasad mikro yang berkurang mengakibatkan pelepasan CO₂ terhenti dan perbandingan C/N akan menjadi lebih kecil. Hal ini mengakibatkan tingginya kandungan N dalam tanah. Kandungan unsur N dalam tanah yang terlalu tinggi yang akan menghambat perkembangan bintil akar *Frankia* pada akar.

Pengaruh jenis tapak dan mulsa terhadap kapasitas penambatan spesifik nitrogen terlihat pada Gambar 3,

pantai pasir putih bertumbuhan bawah menunjukkan kapasitas penambatan yang terbesar yaitu 6.93×10^{-11} n molC₂H₄/g bobot bintil/jam (15.52×10^{-9} g N₂/g bobot bintil/hari) kemudian gunung gamping sebesar 5.77×10^{-11} n molC₂H₄/g bobot bintil/jam (12.92×10^{-9} g C₂H₄/g bobot bintil/hari) dan pasir putih sebesar 3.68×10^{-11} n mol C₂H₄/g bobot bintil/jam (8.26×10^{-9} g N₂/g bobot bintil/hari). Perlakuan tapak pantai pasir putih bertumbuhan bawah menunjukkan kondisi tapak yang mendukung pertumbuhan tanaman inang. Tapak pantai pasir putih bertumbuhan bawah memiliki tekstur yang kasar sehingga kurang mampu mengikat dan kurang mengandung air serta unsur hara. Sebagai konsekuensinya, tanah seperti ini selalu dicirikan dengan rendahnya kandungan bahan organik dalam tanah serta ketersediaan unsur N dan P (Madejon *et al.*, 2007). Mulumba dan Rattan (2008) mengatakan bahwa salah satu usaha untuk merubah agregasi tanah adalah dengan meningkatkan kandungan bahan organik di dalamnya. Lebih lanjut Buckman dan Nyle (1982) menjelaskan bahwa tanah bertekstur kasar dapat diatasi dengan penambahan bahan organik ke dalam tanah maupun dengan adanya asosiasi tumbuhan bawah yang tumbuh di atas permukaan tanah. Adanya sistem perakaran tumbuhan lain yang ada dapat membantu pembentukan dan pematangan agregat tanah.



Gambar 3. Rerata kapasitas penambatan spesifik nitrogen akibat pengaruh tapak dan jenis mulsa ($\times 10^{-11}$ n molC₂H₄/g/jam)

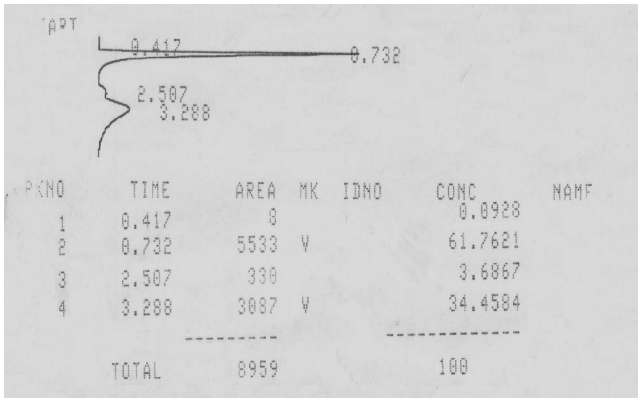
Keterangan: Lihat Gambar 1

Pada perlakuan interaksi pengaruh terhadap kemampuan penambatan spesifik nitrogen menjadi berbeda. Berdasarkan hasil uji nitrogenase (Gambar 4) penambahan mulsa jerami pada tapak gunung gamping dengan inokulasi *Frankia* menunjukkan aktivitas penambatan nitrogen yang lebih tinggi yaitu 11.81×10^{-11} n molC₂H₄/g bobot bintil/jam (26.45×10^{-9} g N₂/g bobot bintil/hari). Penambatan spesifik nitrogen yang

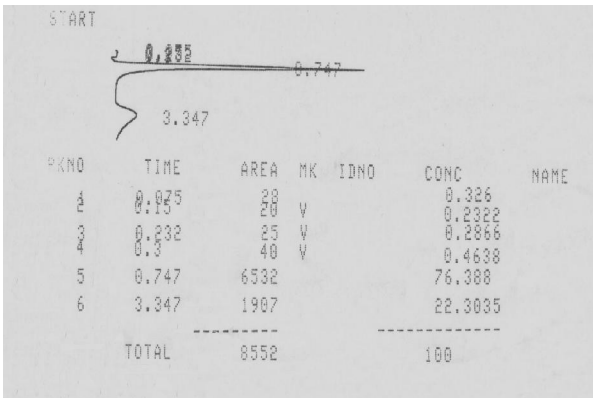
terendah ditunjukkan oleh perlakuan mulsa kompos pada tapak pasir putih tanpa inokulasi *Frankia* yaitu 1.76×10^{-11} n molC₂H₄/g bobot kering bintil/jam (Gambar 2). Proses penambatan nitrogen merupakan proses yang membutuhkan energi yang cukup besar. Simbiosis *Actinorhizae* menggunakan senyawa karbon yang diperoleh dari tanaman inang sebagai energi dalam melakukan penambatan nitrogen (Verghese dan Arvind,

2002). Lebih lanjut dikatakan bahwa jumlah bintil akar yang terbentuk akibat simbiosis ini tidak menggambarkan tingginya efektifitas penambatan

nitrogen yang terjadi, hal ini disebabkan karena sebagian bintil akar tanaman mengandung *haemoglobin* dan sebagian lagi tidak.



(a)



(b)

Gambar 4. (a) Hasil uji nitrogenase perlakuan mulsa jerami pada tapak gunung gamping dengan inokulasi *Frankia* menunjukkan aktivitas penambatan tertinggi, (b) Hasil uji nitrogenase perlakuan mulsa kompos pada tapak pasir putih tanpa inokulasi *Frankia* menunjukkan aktivitas penambatan terendah

Keberadaan ataupun tinggi rendahnya kadar *haemoglobin* berkaitan dengan keterbatasan dalam mendapatkan oksigen. Tapak gunung gamping, dicirikan dengan tanah yang memiliki porositas yang lebih baik dibandingkan tapak pasir putih. Mulsa umumnya dapat memberikan pengaruh positif pada kondisi tempat tumbuh, meskipun respon yang ditunjukkan tidak selalu sama bergantung pada jenis tanah, kandungan yang sudah ada, tipe mulsa, iklim serta pemanfaatan lahan (Mulumba dan Rattan, 2008).

KESIMPULAN

- 1. Perlakuan tapak pantai pasir putih bertumbuhan bawah dan jenis mulsa jerami memberikan kemampuan pembentukan bintil akar yang terbaik pada tanaman Cemara udang.
- 2. Perlakuan mulsa jerami pada tapak gunung gamping disertai dengan inokulasi *Frankia* memberikan kemampuan penambatan spesifik nitrogen yang terbesar yaitu 11.81x10⁻¹¹n molC₂H₄/g bobot kering bintil/jam (26.45x10⁻⁹n g N₂/g bobot kering bintil/hari).

DAFTAR PUSTAKA

Abberton, M.T., T.P.T. Michaelson-Yeates, J.H. MacDuff. 1998. Characterization of novel inbred lines of white clover (*Trifolium repens* L.). I. Dynamics of plant growth and nodule

development in flowing solution culture. *Euphytica* 103:35–43.

Binkley, D., R. Senock, K. Cromack Jr. 2003. Phosphorus limitation on nitrogen fixation by *Falcaltaria* seedlings. *Forest Ecology and Management* 186: 171–176.

Buckman, H., B. Nyle. 1982. Ilmu Tanah. Terjemahan Prof. Soegiman. Bharata Karya Aksara. Jakarta.

Cabrerizo, P.M., E.M. Gonzalez, P.M. Aparicio-Tejo, C. Aresse-Igor. 2001. Continuous CO₂ enrichment leads to increased nodule biomass, carbon availability to nodules and activity of carbonmetabolising enzymes but does not enhance specific nitrogen fixation in pea. *Physiologia Plantarum*. 113: 33–40.

Gomez, K.A., A.A. Gomez. 1984. Statistical Procedures for Agricultural Research. John Willey and Sons.

Haase, S., G. Neumann, A. Kania, Y. Kuzyakov, V. Romheld, E. Kandeler. 2007. Elevation of atmospheric CO₂ and N-nutritional status modify nodulation, nodule-carbon supply, and root exudation of *Phaseolus vulgaris* L. *Soil Biology & Biochemistry* 39:2208–2221.

Hansen, A.P., P.M. Gresshoff, J.S. Pate, dan D.A. Day. 1990. Interaction between irradiance levels, nodulation and nitrogenase activity of soybean cv.

- Bragg and a supernodulating mutant. J. Plant Physiol. 136:172-179.
- Hungria, M., T.R.J. Bohrer. 2000. Variability of nodulation and dinitrogen fixation capacity among soybean cultivars. Biology and Fertility of Soils 31:45–52.
- Ji, S., P.W. Unger. 2001. Soil water accumulation under different precipitation, potential evaporation, and straw mulch conditions. Soil Sci. Soc. Am. J. 65:442–448.
- Lira Jr., M.A., A.S.T. Lima, J.R.F. Arruda, D.L. Smith. 2005. Effect of root temperature on nodule development of bean, lentil and pea. Soil Biology & Biochemistry 37:235–239.
- MacDicken, K.G. 1994. Selection and Management of Nitrogen-fixing Trees. Winrock International, Morrilton, AR.
- Madejon, E., F. Moreno, J.M. Murillo, F. Pelegrin. 2007. Soil biochemical response to long-term conservation tillage under semi-arid Mediterranean conditions. Soil Till. Res. 90:162–170.
- Marilley, L., U.A. Hartwig, M. Aragno. 1999. Influence of an elevated atmospheric CO₂ content on soil and rhizosphere bacterial communities beneath *Lolium perenne* and *Trifolium repens* under field conditions. Microbial Ecology. 38:39–49.
- Mulumba, L.N., L. Rattan. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. Soil & Tillage Research 98:106–111.
- Nutman, P.S. 1952. Studies on the physiology of nodule formation. Experiments on the excision of root-tips and nodules. Annals of Botany 16:80-102.
- Rao, N. S. S. 1994. Mikroorganisme Tanah dan Pertumbuhan Tanaman. Edisi kedua. Universitas Indonesia Press. Jakarta.
- Reddel, P., G.D. Bowen, A.D. Robson. 1985. The effects of soil temperature on plant growth, nodulation, and nitrogen fixation in *Casuarina cunninghamiana* Miq. New Phytol. 100:115-122.
- Rudresh, D.L., M.K. Shivaprakash, R.D. Prasad. 2005. Effect of combined application of *Rhizobium*, phosphate solubilizing bacterium and *Trichoderma* spp. on growth, nutrient uptake and yield of chickpea (*Cicer aritenium* L.). Applied Soil Ecology 28:139–146.
- Suhardi, Sutikno. 2002. Rehabilitation of Sand Dune Area for Food and Wood Production. Title of Professorial Chair sponsored by SEARCA. Los Banos. Philippines.
- Sayed, W.F., C.T. Wheeler, H.H. Zahran, A.A.M. Shoreit. 1997. The effect of temperature and soil moisture on the survival and symbiotic effectivity of *Frankia*. J. Soil. Biol. Fert. 25:349–353.
- Torrey, J.G. 1981. Root development and root nodulation in *Casuarina*. p.180-192. In S.J. Midgley, J.W., Turnbull, and R.D., Johnston (eds.). *Casuarina* Ecology, Management and Utilization. CSIRO, Melbourne, Australia.
- Torrey, J.G., S. Racette. 1989. Specificity among the *Casuarinaceae* in root nodulation by *Frankia*. Plant and Soil 118:157-164.
- Verghese, S., M. Arvind K. 2002. *Frankia*–actinorhizal symbiosis with special reference to host–microsymbiont relationship. Current Science. Vol. 83(4): 404-407.
- Yang, Y. 1995. The effects of phosphorus on nodule formation and function in the *Casuarina-Frankia* symbiosis. Plant and Soil 176:161-169.